Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 253-269

Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters

M. Almaei[1], S. M. Nassiri[2*], M. A. Nematollahi[3], D. Zare[4], M. Khorram[5]

1- Ph. D. Student, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering and Seafood Processing Research Center, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
4- Professor, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
5- Associate Professor, Department of Gas Engineering, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: nasiri@shirazu.ac.ir)

Received: 10 February 2023 Revised: 16 April 2023 Accepted: 30 April 2023 Available Online: 31 August 2024	**How to cite this article:** Almaei, M., Nassiri, S. M., Nematollahi, M. A., Zare, D., & Khorram, M. (2024). Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 253-269. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145

Introduction

Drying shrimp is one of the storage methods that, while increasing the shelf life, leads to the production of a versatile product with various uses, from consumption as snacks to use as one of the main components of foods. Drying is preferred over other preservation methods because it offers numerous advantages, including extended shelf life, enhanced microbial stability, convenient consumption, reduced transportation costs, increased value, and product diversity.

To accurately model these processes and thus obtain information on factors such as shelf life and energy consumption, it is necessary to determine the product’s initial and final temperatures, its geometry and dimensions, and its thermo-physical characteristics. Simulation of different drying processes requires accurate estimation of the effective moisture diffusion coefficient, which is highly dependent on temperature and humidity. Its dependence can be shown by an equation with an Arrhenius structure as an empirical function of humidity and temperature, or by considering the activation energy.

It is necessary to have sufficient knowledge about heat and mass transfer characteristics, such as diffusion or penetration coefficient and the heat transfer coefficient to estimate the final temperature and drying time. This study investigated the drying process of peeled farmed shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using a convective hot air dryer. Various parameters such as shrinkage and the effective moisture diffusion coefficient were examined.

Materials and Methods

A drying device was built to conduct experimental studies on drying shrimp samples. The experiments were conducted on sliced shrimp meat samples at temperatures of 40, 50, and 60 degrees Celsius, with a constant air velocity of 1.5 m/s. The experimental drying models were based on diffusion theory. In these models, it is assumed that the resistance to moisture diffusion occurs from the outer layer of the food. In most cases, Fick's second law was used to describe the phenomenon of moisture penetration.

The study used the standard method of immersion in toluene to measure volume changes in the samples. During the drying process, the volume of the samples was measured at 45-minute intervals, and their volume changes were calculated. To measure the moisture content of the samples, each test started by recording the initial weight of the samples using a digital scale with an accuracy of ±0.001 g. During the drying process, the

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145

samples were weighed each time their volume was measured.

Shrinkage during the drying process is commonly modeled by finding a relationship between shrinkage and moisture, using linear and non-linear models. In most cases, effective permeability is defined as a function of humidity and temperature. For this purpose, curve-fitting methods were employed to analyze the data collected from experimental tests. The appropriate function was extracted by incorporating the Arrhenius equation, which is applicable to most food items.

Results and Discussion

Based on the results of statistical indices, the linear model was the best model for depicting the relationship between shrinkage changes versus moisture ratio changes among the various experimental models evaluated for shrinkage and drying kinetics. Similarly, the Weibull distribution demonstrated superior performance in expressing variations in moisture ratio over time. A moisture dependent experimental model was used to express the variations in the apparent density of shrimp, resulting in a computed range of 1017-1117 kg m^{-3}. Furthermore, an Arrhenius equation was derived to express the effect of moisture content and temperature on the effective diffusion coefficient of shrimp. According to the results, the effective diffusion coefficient of shrimp exhibited variations ranging from 0.08×10^{-9} m^2 s^{-1} to 7.39×10^{-9} m^2 s^{-1}. When deriving the effective diffusion coefficient, the impact of the number of terms in Fick's second law on the variation of the moisture ratio was studied. The findings revealed that increasing the number of terms beyond 100 did not significantly affect the model's outputs.

Conclusion

The linear model had the highest coefficient of determination (R^2) among the evaluated shrinkage models, as well as the lowest root mean square error and sum of square error (SSE). This makes it the most optimal model for interpreting shrinkage at the tested temperature levels. The Weibull distribution experimental model proved to be the most suitable for expressing changes in the moisture ratio of shrimp meat slices over time within the evaluated temperature range. The Arrhenius model accurately predicts changes in the effective diffusion coefficient of shrimp slices with respect to temperature and moisture content within the tested temperature range.

Keywords: Drying, Effective moisture diffusion coefficient, Shrimp meat, Shrinkage

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۲٦۹-۲٥۳

مطالعه روند خشک‌شدن گوشت میگوی پرورشی در خشک‌کن هوای گرم همرفتی و تغییرات برخی فراسنجه‌های مرتبط با آن

محسن المعی[۱]، سید مهدی نصیری[۲*]، محمد امین نعمت الهی[۳]، داریوش زارع[٤]، محمد خرم[٥]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

چکیده

روند خشک‌کردن میگوی پرورشی (*Litopenaeus vannamei*) پوست‌گیری‌شده در یک خشک‌کن هوای گرم همرفتی برای تعیین فراسنجه‌های چروکیدگی، سینتیک خشک‌شدن، جرم حجمی و ضریب انتشار مؤثر رطوبت مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های میگو به شکل ورقه در سه سطح دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس با سرعت ثابت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه در دستگاه خشک‌کن ساخته‌شده، خشک شدند و وزن و حجم نمونه‌ها طی فرآیند خشک‌شدن، برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. از بین مدل‌های تجربی در نظر گرفته‌شده برای چروکیدگی و سینتیک خشک‌کردن، مدل خطی بهترین مدل برای بیان تغییرات چروکیدگی در مقابل تغییرات نسبت رطوبت و مدل توزیع ویبال به‌عنوان بهترین مدل برای بیان تغییرات نسبت رطوبت-زمان انتخاب شد. از یک مدل تجربی وابسته به رطوبت برای بیان تغییرات جرم حجمی ظاهری میگو استفاده شد که با تخمین ضرایب آن، دامنه $kg\ m^{-3}$ ۱۱۱۷-۱۰۵۰ به‌دست آمد. افزون بر آن برای بیان اثر محتوای رطوبت و دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت میگو یک رابطه آرنیوسی استخراج شد. بر اساس نتایج، تغییرات ضریب انتشار مؤثر رطوبت میگو در دامنه $m^2\ s^{-1}$ ۰/۰۸×۱۰$^{-9}$ تا $m^2\ s^{-1}$ ۷/۳۹×۱۰$^{-9}$ به‌دست آمد. اثر بسط تعداد جملات قانون دوم فیک بر تغییرات نسبت رطوبت برای معادله ضریب انتشار مؤثر، مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد افزایش تعداد جملات بیشتر از ۱۰۰ جمله اثر قابل‌ملاحظه‌ای در دقت خروجی مدل ندارد و بر همین اساس تعداد صد جمله برای تخمین ضریب انتشار رطوبت توصیه می‌شود. همچنین برای تعیین این ضریب، اثر چروکیدگی به‌عنوان عامل تاثیرگذار باید لحاظ گردد.

واژه‌های کلیدی: چروکیدگی، خشک کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، گوشت میگو

مقدمه

مصرف غذاهای دریایی از زمانی که به‌عنوان منابع مهم مواد مغذی برای سلامتی انسان شناخته شدند، در حال افزایش است. پروتئین، چربی‌ها و ترکیبات فعال زیستی در غذاهای دریایی دارای جنبه‌های منحصر به فردی هستند که آن‌ها را از حیوانات خشکزی متفاوت می‌کند (Azimi, 2016). آبزی‌پروری یکی از فعالیت‌های اقتصادی مهم در بسیاری از کشورها است که منجر به اشتغال‌زایی، توسعه اقتصادی، کاهش آلایندگی منابع دریایی طبیعی و بهبود وضعیت ایمنی غذایی می‌گردد. میگو از مهم‌ترین غذاهای دریایی است که غنی از پروتئین، اسیدهای چرب غیراشباع، کلسیم و بسیاری از ویتامین‌ها بوده و به اشکال مختلف در تهیه مواد غذایی در نقاط گوناگون جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mohebi, Akbarzadeh, Shahidi & Porshhabi, 2007).

میزان کل صید و آبزی‌پروری در ایران در سال ۱۳۹۸، بالغ بر یک میلیون و دویست هزار تن بوده است که سهم میگو در آن بیش از ۵۶۰۰۰ تن است. از این مقدار ۹۹۳۷ تن به‌صورت صید در آب‌های

۱- دانشجوی دکتری بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۲- دانشیار، بخش مهندسی بیوسیستم و مرکز پژوهشی فرآوری آبزیان، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۳- دانشیار، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۴- استاد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۵- دانشیار بخش مهندسی گاز، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nasiri@shirazu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145

جنوب کشور، ۴۶۱۱۴ تن به‌صورت پرورش در آب‌های شور و حدود ۱۶ تن به‌صورت پرورش در آب شیرین و شاه‌میگو بوده است (Anonymous, 2020). از این میزان تولید بیش از ۹۵٪ آن صادر می‌گردد که بخش اعظم آن را میگوی منجمد تشکیل می‌دهد. اما نکته حائز اهمیت در نظر گرفتن متنوع‌سازی بازارهای عرضه و نیز تولید محصولات با ارزش افزوده بالا و تأکید بر مسائل کیفی است (Mohebi *et al.*, 2007).

خشک کردن به سبب مزایایی از قبیل زمان ماندگاری طولانی، پایداری میکروبی، قابلیت مصرف آسان، کاهش هزینه‌های حمل و نقل، ارزش افزوده بالا و تنوع محصول نسبت به سایر روش‌های نگهداری ترجیح داده می‌شود (Radhakrishnan, 1997). خشک‌کردن میگو یکی از روش‌های نگهداری است که ضمن افزایش مدت زمان ماندگاری، منجر به تولید محصولی متنوع و با کاربردهای متفاوت، از مصرف به‌عنوان تنقلات تا کاربرد به‌عنوان یکی از اجزای اصلی غذاها می‌گردد. خشک‌کردن میگو در اکثر نقاط جهان و نیز مناطق جنوبی ایران به‌صورت سنتی (با یا بدون جوشاندن و خشک‌کردن در آفتاب) انجام می‌گیرد. اما خشک کردن سنتی با آفتاب باعث آلودگی گوشت میگو با گرد و غبار، عوامل میکروبی و حشرات خواهد شد و همچنین فرآیند خشک‌کردن فقط در طول روز امکان‌پذیر است (Wisaiprom *et al.*, 2018). این در حالی است که تولیدکنندگان در جستجوی راه‌هایی برای تولید محصولی با کیفیت، شکل، اندازه، رنگ و پذیرش کلی مناسب هستند که به شدت قیمت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mohebi *et al.*, 2007).

رویکردهای مختلف خشک‌کردن ممکن است بر میزان کیفیت فیزیکی و تغذیه‌ای گوشت میگو اثرگذار باشد، بنابراین اثر روش‌های مختلف خشک‌کردن میگو باید روشن شود زیرا تغییراتی که در نتیجه خشک‌شدن رخ می‌دهد احتمالا بر کیفیت و در نتیجه ارزش نهایی محصول در بازار تأثیر می‌گذارد (Akonor, Ofori, Dziedzoave & Kortei, 2016). برای به حداقل رساندن کاهش وزن و کنترل تغییرات کیفی مرتبط با گرما، فرآیند پخت‌وپز ماهی و سایر آبزیان را می‌توان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی با معادلات انتقال گرما و جرم بهینه کرد (Blikra, Skipnes & Feyissa, 2019). از بررسی تجربی و عددی فرآیند خشک‌کردن میگو و فراسنجه‌های به‌دست‌آمده در فرآیندهای انتقال برای شبیه‌سازی توزیع دما و رطوبت در داخل میگو با کمک نرم‌افزار برای شرایط خشک‌کردن می‌توان استفاده نمود. واکاوی اطلاعات حاصل از حل عددی فرآیند خشک‌کردن میگو بهینه‌سازی مصرف انرژی در فناوری‌های مختلف خشک‌کردن آن را امکان‌پذیر می‌سازد (Nguyen, Ngo & Le, 2019).

شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف خشک‌کردن نیازمند تخمین دقیق ضریب انتشار مؤثر رطوبت است (Anabel, Celia, German & Rosa, 2018). این فراسنجه به شدت به دما و میزان رطوبت وابستگی دارد که سطح وابستگی آن معمولاً با معادله‌ای با ساختار آرنیوسی به‌عنوان تابعی تجربی از رطوبت و دما و یا با در نظر گرفتن انرژی فعال‌سازی نشان داده می‌شود (Komolafe, Oluwaleye, Adejumo, Waheed & Kuye, 2018). هدف از خشک کردن میگو کاهش رطوبت به حداقل مقدار ممکن و مهار آنزیم‌ها و سایر واکنش‌های بیولوژیکی است (Al-Hilphy *et al.*, 2022). از روش‌های متفاوتی برای خشک‌کردن میگو در پژوهش‌های مختلف نظیر، مایکروویو (Farhang, Hossinpour, Darvishi & Nargesi, 2011)، آون و خلایی (Ersan & Tugrul, 2020)، ترکیبی خورشیدی-گازی (Murali *et al.*, 2021) و مادون قرمز (Al-Hilphy *et al.*, 2022) استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داده است که روش‌های مختلف خشک‌کردن ممکن است خواص حرارتی، ضریب انتشار، کیفیت فیزیکی و تغذیه‌ای میگو را به‌صورت متفاوت تحت تاثیر قرار دهد (Akonor, Ofori, Dziedzoave & Kortei, 2016). بنابراین شناخت و بررسی روند تغییرات مواردی نظیر ضریب انتشار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. روش همرفتی با توجه به سادگی، هزینه کم، انعطاف‌پذیری و سهولت کنترل تجهیزات یکی از روش‌های متداول برای خشک‌کردن محصولات مختلف نظیر میگو است (Ersan & Tugrul, 2020)، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

خشک‌کردن مواد غذایی فرآیندی پیچیده است که در آن به‌طور همزمان پدیده‌های انتقال حرارت و جرم اتفاق می‌افتد و یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که مواد غذایی در طول خشک‌شدن به آن دچار می‌شوند، کاهش حجم خارجی یا چروکیدگی[1] است. چروکیدگی میزان کاهش حجم محصول را نسبت به حجم اولیه نشان می‌دهد و شاخصی از خصوصیات ظاهری و شدت تغییرات ساختمانی ماده غذایی است. از دست دادن آب و گرمایش، باعث ایجاد تنش بر ساختار سلولی مواد غذایی شده و در نهایت منجر به تغییر شکل و کاهش در ابعاد ماده غذایی می‌گردد. بررسی مدل‌های خشک‌کردن بدون در نظر گرفتن چروکیدگی منجر به نتایج قابل اطمینانی نخواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که داده‌های تجربی ناشی از خشک‌کردن مواد غذایی انطباق مطلوبی با مدل‌های خشک‌کردنی که در آن‌ها چروکیدگی در نظر گرفته شده است، دارند. دو رویکرد کاملاً متفاوت به‌منظور مدل کردن چروکیدگی فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی اتخاذ شده است. رویکرد اول شامل یک برازش تجربی از داده‌های حاصل از چروکیدگی به‌عنوان تابعی از مقدار رطوبت است. رویکرد دوم بیشتر بنیادی و مبتنی بر تفسیر فیزیکی سامانه‌های غذایی است و تلاش

1- Shrinkage

می‌کند تا تغییرات هندسی را بر اساس قوانین تبدیل جرم و حجم پیش‌بینی کند (Mayor & Sereno, 2004). علاوه بر این چروکیدگی باعث بروز تغییرات در خواص فیزیکی و به‌خصوص در جرم حجمی می‌شود. جرم حجمی واقعی و ظاهری دو معیار متداول برای تعیین جرم حجمی مواد غذایی هستند (Niamnuy, Devahastin, Soponronnarit & Raghavan, 2008). در اکثر موارد به علت راحتی و سرعت محاسبات از جرم حجمی ظاهری برای بیان تغییرات جرم حجمی استفاده می‌شود. از آنجا که جرم حجمی ظاهری بستگی به مقدار رطوبت ماده غذایی دارد بعضی از محققین از روابط تجربی وابسته به مقدار رطوبت برای تخمین آن استفاده می‌کنند (Guiné, 2006).

در پژوهش‌های مختلف مدل چروکیدگی محصولاتی نظیر سیب‌زمینی (Mulet, Caicia Reverter, Bon & Berna, 2000)، موز (Queiroz & Nebra,2001)، هویج (Mayor & Sereno, 2004)، گیلاس (Ochoa, Kesseler, Pirone, Marquez & DeMichelis, 2002) و گوشت ماهی (Park, 1998) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خشک‌کردن میگو با روش ترکیبی هوای گرم و امواج مادون قرمز حدود ۳۲ درصد چروکیدگی در محصول خشک‌شده ایجاد کرد (Tirawanichakul, Na Phatthalung, & Tirawanichakul, 2011). در همین ارتباط افزایش دما باعث افزایش درصد چروکیدگی در میگو می‌شود (Wang *et al.*, 2018). علی‌رغم این نتایج، مطالعات محدودی در زمینه مدل چروکیدگی و سایر فراسنجه‌های مرتبط در زمینه میگو صورت پذیرفته است. بنابراین تعیین صحیح مدل چروکیدگی میگو و تاثیر آن بر رابطه فیک از طریق بسط جملات معادله مرتبط با ضریب انتشار مؤثر رطوبت، نقش مهمی در شناخت و تجزیه و تحلیل دقیق فرآیند خشک‌کردن میگو بازی می‌کند. هدف پژوهش حاضر بررسی تجربی فرآیند خشک‌شدن نمونه میگو و تخمین خواص مرتبط با آن و همچنین تعیین مناسب‌ترین مدل ریاضی برای فرآیند خشک‌کردن، چروکیدگی میگو و ضریب انتشار رطوبت میگو با توجه به مدل چروکیدگی با بسط تعداد جملات مناسب از قانون دوم فیک است که از جمله مهم‌ترین نوآوری این پژوهش به‌شمار می‌آید.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

در پژوهش حاضر از میگوی پرورشی وانامی (*Litopenaeus vannamei*) یا به اصطلاح گونه سفید غربی برای بررسی تغییرات سینتیک خشک‌کردن و تعیین مناسب‌ترین مدل چروکیدگی استفاده شد. نمونه‌های تازه میگو پس از تهیه از مزارع پرورش میگو واقع در استان بوشهر و برش سر و دم، پوست‌گیری‌شده و در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها به شکل ورقه‌هایی با ابعاد تقریبی ۲ × ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر با تیغ برش زده شدند (شکل ۱).

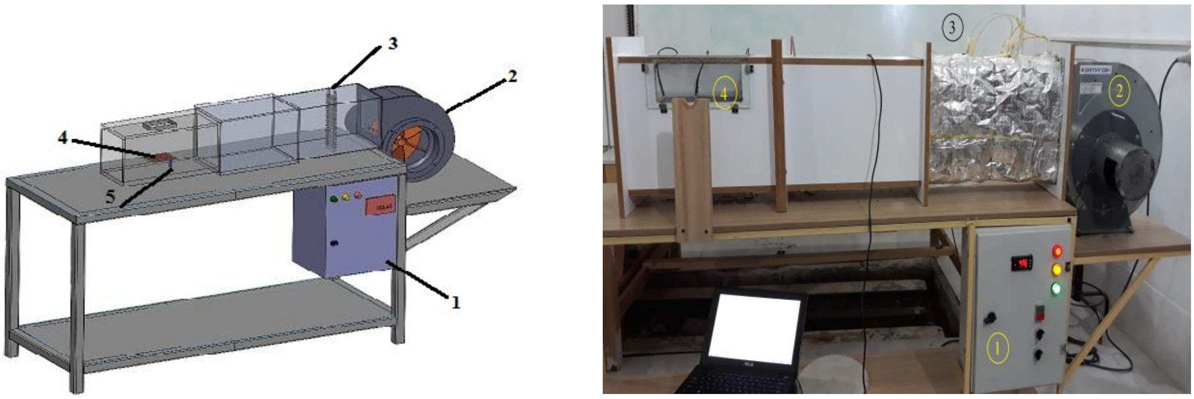
خشک‌کردن نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های تجربی خشک‌کردن نمونه‌های میگو، یک دستگاه خشک‌کن ساخته شد (شکل ۲). خشک‌کن مجهز به یک پنکه با قدرت هوادهی حداکثر ۷۹۰ $m^3\ hr^{-1}$ ساخت شرکت دمنده، ایران (BEB-25/10L4S) و همچنین دو عدد المنت حرارتی با توان مجموع ۲۰۰۰ وات بود. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی خشک‌کن از دو عدد ماژول سنسور دما و رطوبت (Am2301) ساخت کشور چین با دقت اندازه‌گیری دمای ۰/۵± درجه سلیسوس و رطوبت ۳± درصد در ورودی هوا به پنکه و خروجی خشک‌کن استفاده شد. برای اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌ها از بارسنج Zemic L6D-C3 ساخت کشور چین با ظرفیت حداکثر ۲/۵ kg و دقت ۰/۱ gr± استفاده گردید. این تجهیزات از طریق برنامه‌ریزی برد آردینو با قابلیت تنظیم فواصل زمانی بین داده‌برداری‌ها در طول آزمایش‌ها، دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی و همچنین وزن نمونه‌ها را به‌صورت برخط اندازه‌گیری کرده و روی یک کارت حافظه (SD) داده‌ها را ذخیره می‌کرد. کنترل دمای خشک‌کن از طریق ترموستات (Autonics TC4Y) با کمک سنسور حرارتی PT-100 نصب شده در کانال اصلی خشک‌کن صورت می‌گرفت. بر اساس پژوهش‌های پیشین بهترین محدوده دمای خشک‌کردن برای آبزیان و همچنین میگو ۴۰–۸۰ $^\circ C$ است (Blikra *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2019)، بنابراین آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ورقه گوشت میگو در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ثابت ۱/۵ متر بر ثانیه انجام گرفت.



شکل ۱– ابعاد نمونه ورقه تهیه شده از گوشت میگو

Fig.1. Dimensions of a sample slab prepared from shrimp meat



a b

شکل ۲– a) طرحواره خشک‌کن ساخته‌شده برای خشک‌کردن ورقه‌های گوشت میگو، b) تصویری از نمای کلی خشک‌کن

۱) واحد کنترل الکتریکی، ۲) پنکه، ۳) المنت‌های حرارتی، ۴) سینی نمونه‌های میگو، ۵) بارسنج

Fig.2. a) Schematic of dryer made for drying shrimp meat slab and b) overall view of dryer

1) Electrical control unit, 2) Fan, 3) Thermal elements, 4) Shrimp samples tray, and 5) Load cell

مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن

اساس مدل‌های تجربی خشک‌شدن بر مبنای نظریه انتشار است. در این مدل‌ها فرض بر این است که مقاومت در مقابل انتشار رطوبت از لایه خارجی ماده غذایی صورت می‌پذیرد (Komolafe *et al.*, 2018). در مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن معمولاً به جای محتوای رطوبت از نسبت رطوبت ($MR = \frac{X}{X_0}$) استفاده می‌شود (Dai, Wang, Ren, Liu & Zhang, 2018). نسبت رطوبت بر حسب زمان با استفاده از مدل‌های ریاضی توصیف می‌شود (Buzrul, 2022). از رابطه (۱) برای این منظور استفاده می‌شود (Zielinska & Markowski, 2007; Aniesrani Delfiya, Murali, Alfiya & Samuel, 2020):

$$\frac{X_t}{X_0} = exp(-kt) \qquad (۱)$$

که $\frac{X_t}{X_0}$ همان نسبت رطوبت[1] (MR) است. رطوبت اولیه (X_0) بر مبنای خشک ($kg\ water(kg\ dry\ solid)^{-1}$)، با قرار دادن نمونه در آون ۱۰۵°C به مدت ۲۴ ساعت محاسبه شد (Porciuncula, Zotarelli, Carciofi & Laurindo, 2013).

مدل‌های تجربی خشک‌شدن را می‌توان با معادلات زیادی که با مجموعه خاصی از داده‌های آزمایشگاهی سازگاری داشته باشند، بیان کرد. مرسوم‌ترین مدل‌های تجربی که توسط پژوهشگران مختلف برای توصیف فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته و در پژوهش حاضر نیز مورد بررسی واقع شده‌اند، در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این روابط a، b، c، k و n ضرایب ثابت مدل‌ها و t زمان خشک‌کردن بر حسب دقیقه است.

1- Moisture ratio

جدول ۱– مدل‌های تجربی متداول برای خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی

Table 1– Common empirical models for drying food and agricultural products

مدل **Model**	معادله **equation**	منبع **Reference**
Newton	$MR = exp(-kt)$	Ceylan, 2008
Henderson & Pabis	$MR = a\ exp(-kt)$	Manjeet, 1984
Logarithmic	$MR = a\ exp(-kt) + c$	Doymaz, 2008
Logestic	$MR = a/(1+b)exp(kt)$	Toğrul & Pehlivan, 2002
Two-term exponential	$MR = a\ exp(-kt) + (1-a)\ exp(-kat)$	Sharaf-Eldeen, Blasdell & Hamdy, 1984
Simplified Fick's diffusion	$MR = a\ exp(-b(t/c^2))$	Azzouz, Guizani, Jomma & Belghith, 2002
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Yi, Wu, Zhang, Li & Luo, 2012
Weibull distribution	$MR = a - bexp(-kt^n)$	Yi *et al.*, 2012

تعیین معادله ضریب انتشار مؤثر رطوبت

انتقال رطوبت در هر ماده غذایی در طی فرآیند خشک‌کردن موضوع بسیار مهمی است. در اغلب موارد قانون دوم فیک برای توصیف پدیده نفوذ رطوبت به‌کار می‌رود (Reyes, Alvarez & Marquardt, 2002):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (۲)$$

فرض اصلی حاکم بر این معادله ناپایدار بودن فرآیند است، که در آن t زمان، x مختصه مکانی[1] و D_e ضریب مؤثر انتشار رطوبت (m^2s^{-1}) است. حل معادله فیک برای یک ورقه در یک بستر لایه نازک و با فرض ضریب انتشار ثابت به‌صورت زیر است (Hashemi, Mowla & Kazemeini, 2009):

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2}\left[\sum_{i=1}^{\infty}\frac{1}{(2i-1)^2} exp\left(-(2i-1)^2\pi^2\frac{D_e}{L^2}t\right)\right] \quad (۳)$$

که در آن L ضخامت ورقه گوشت میگو (بر حسب متر) است. در بیشتر موارد از جمله اول و به‌ندرت از بسط دوجمله اول رابطه (۳) برای تخمین ضریب انتشار استفاده می‌شود (Amankwah, Dzisi, Staten & Boxtel, 2018). درصورتی‌که زمان خشک شدن و نسبت رطوبت به‌ترتیب بالای ۷ دقیقه و کمتر از ۰/۳۶ باشد، در بسط یک جمله خطای نسبی در محدوده ۵ درصد خواهد بود. همچنین این مقدار در بسط دوجمله به‌ترتیب برای زمان خشک شدن و نسبت رطوبت، ۱/۵ دقیقه و ۰/۶۷ است (Pabis,Jayas & Cenkowski, 1998). برای افزایش دقت در محاسبه معادله ضریب انتشار مؤثر رطوبت ورقه گوشت میگو، در پژوهش حاضر برای انتخاب تعداد جمله‌های مؤثر از رابطه (۳)، ابتدا سه ضریب انتشار ثابت فرضی برای میگو در نظر گرفته شد. برای حصول اطمینان از اینکه ضرایب فرض شده خارج از محدوده نباشند، مطابق تحقیق گزارش شده (Nguyen *et al.*, 2019) مقادیر زیر برای ضریب انتشار مورد بررسی قرار گرفتند:

1- Position coordinate

$D=[1\times10^{-7},1\times10^{-10},5\times10^{-11}]\ m^2s^{-1}$

سپس در هر مقدار ضریب انتشار رطوبت، اثر تعداد جملات بر اساس مقادیر زیر مورد بررسی قرار گرفت:

i=[1,10,20,100,1000]

برای محاسبه رطوبت و حل رابطه (۶) از الگوریتم زیر استفاده شد:

۱- دریافت مقدار گام زمانی

۲- دریافت رطوبت در ابتدای گام زمانی

۳- محاسبه ضریب انتشار بر اساس اطلاعات دریافتی در ابتدای گام زمانی

۴- محاسبه رطوبت در پایان گام زمانی بر اساس رابطه (۳)

۵- در صورت وجود گام زمانی بعدی تکرار مجدد مراحل

برای حصول اطمینان از نتایج حاصل‌شده، اثر چروکیدگی در تغییرات بعد مشخصه یا همان ضخامت ورقه گوشت میگو مطابق رابطه (۴) در نظر گرفته شد (Zielinska & Markowski, 2007):

$$L = L_0\left(A\frac{X}{X_0}+B\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

که در آن A و B ضرایب استخراج‌شده از معادله چروکیدگی و L_0 ضخامت اولیه ورقه (برحسب متر) است.

قابلیت نفوذ مؤثر در اغلب موارد بر اساس تابعی از رطوبت و درجه حرارت تعریف می‌شود. برای این منظور با استفاده از روش‌های برازش منحنی بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی و لحاظ کردن معادله آرینیوس (برای اغلب مواد غذایی) تابع مناسب استخراج شد (Zielinska & Markowski, 2007):

$$D_e = a\ exp\left(-\frac{b}{273.15+T} + cX\right) \quad (۵)$$

در این معادله T دمای ماده (درجه سلسیوس) و a، b و c ثابت‌های معادله هستند.

مدل‌سازی چروکیدگی

چروکیدگی (s) طبق تعریف نسبت حجم ظاهری در رطوبت

نهایی (V) به حجم ظاهری در رطوبت اولیه (V_0) ماده غـذایی اسـت (Ochoa *et al.*, 2002). در پژوهش حاضر برای تعیین تغییرات حجم نمونه از روش استاندارد اندازه‌گیری تغییرات حجم با روش غوطه‌وری استفاده گردید (Zielinska & Markowski, 2007). حجـم ابتـدایی نمونه‌ها از طریق غوطه‌ور کردن آن‌ها در داخل بشـر حـاوی تولـوئن به‌دست آمد. سپس در طول زمان خشک‌شدن بـه فواصـل ۴۵ دقیقـه حجم نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد و تغییرات حجم آن‌هـا ($\Delta v = v_i - v_{i-1}$) محاسبه گردیـد. بـرای انـدازه‌گیری محتـوای رطـوبتی نمونه‌ها، در ابتدای هر آزمایش وزن نمونه‌ها بـا تـرازوی دیجیتـال بـا دقت ۰/۰۰۱± گرم ثبت شدند. سپس در طول زمان خشک نمونـه‌ها، هم‌زمان با اندازه‌گیری حجم، نمونه‌ها توزین شدند.

متداول‌ترین روش برای مـدل‌کردن چروکیـدگی در طـی فرآینـد خشک‌کردن، به‌دست آوردن یـک رابطـه تجربـی بـین چروکیـدگی و رطوبت است که بـرای ایـن منظـور از مـدل‌های خطـی و غیرخطـی استفاده می‌شود (Mayor & Sereno, 2004). در جـدول ۲ فهرسـت متداول‌ترین مدل‌های ریاضی تجربی چروکیدگی که توسـط محققـین مختلف مورد استفاده قرار گرفتـه، نشـان داده شـده اسـت. در روابـط ارائه‌شده در این جدول، ضرایب a، b، c و d ثابت‌های مدل‌ها هستند. در پژوهش حاضر نیز از این مدل‌ها برای انطباق با داده‌هـای تجربـی استفاده شد.

جدول ۲– مدل‌های تجربی برای چروکیدگی ورقه‌های گوشت میگو

Table 2- Empirical models for shrimp meat slabs shrinkage

مدل Model	معادله equation	هندسه Geometry	منبع Reference
1	$s = a\frac{X}{X_0} + b$	ورقه، مکعب، استوانه Slab, Cube, Cylinder	Ochoa *et al.*, 2002
2	$s = a + b\left(\frac{X}{1+X}\right) + exp(c\frac{X}{1+X})$	ورقه، استوانه، نیم‌کره Slab, Cylinder, Hemisphere	Kaminski, Szarycz and Janowicz, 1996
3	$s = a + bX + cX^{\frac{3}{2}} + dexp(kX)$	ورقه slab	Vázquez, Chenlo, Moreira and Costoyas, 1999
4	$s = a + b\frac{X}{X_0} + c(\frac{X}{X_0})^2$	ورقه، استوانه Slab, Cylinder	Mayor and Sereno, 2004
5	$s = aexp(\frac{bX}{X_0})$	ورقه، استوانه Slab, Cylinder	Mayor and Sereno, 2004

مدل‌سازی جرم حجمی

برای جرم حجمی ظاهری میگو (Suvarnakuta, Devahastin & Mujumdar, 2007) رابطه تجربی (۶) را که با محتوای رطـوبتی مرتبط است پیشنهاد داده‌اند:

$$\rho = c_1 + c_2(\frac{X}{X+1}) \quad (۶)$$

که در آن ρ جرم حجمی ($kg\ m^{-3}$)، X محتوای رطوبتی میگو بر مبنای خشک ($kg\ kg^{-1}$)، c_1 و c_2 ضـرایب تجربـی وابسـته بـه دمـا هستند. در پژوهش حاضر از این مدل برای بیان تغییرات جرم حجمی میگو نسبت به محتوای رطوبتی استفاده شد.

تحلیل آماری

در تمامی موارد مطرح‌شده برای تخمین فراسنجه‌ها و ضـرایب در هر یک از مدل‌ها، از روش برازش غیرخطی منحنی استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار matlab R2018 و تابع lsqcurvefit نوار ابزار بهینه‌سازی استفاده گردید. از شاخص‌های آماری ضریب تبیـین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کمترین مقدار مربع کـای (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE) برای تعیین بهترین مدل در هر قسمت استفاده شد (Yi *et al.*, 2012):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{exp,i}-y_{pre,i})}{\sum_{i=1}^{n}(y_{pre,i}-\overline{y_{pre}})} \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_{i,exp}-y_{i,pre})^2}{n}} \quad (۸)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{exp,i}-y_{pre,i})^2}{n-p} \quad (۹)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}(y_{pre,i}-\overline{y_{pre}})^2 \quad (۱۰)$$

در ایـن روابـط n تعـداد تکـرار، p تعـداد ثابت‌هـای مـدل، *pre* فراسـنجه‌های مربـوط بـه مـدل و *exp* فراسنجه‌های مربـوط بـه آزمایش‌های تجربی است. داده‌برداری در این پژوهش بـا سـه تکـرار انجام گرفت.

نتایج و بحث

چروکیدگی

با استخراج ضرایب مدل‌های مختلف چروکیدگی، مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری در نظر گرفته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. جدول ۳ ضرایب استخراج‌شده و شاخص‌های آماری برای مدل‌های مختلف چروکیدگی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان داد که مدل خطی (مدل ۱) با داشتن شاخص‌های آماری مناسب، بهترین مدل برای تفسیر داده‌های تجربی است. نتایج تحقیقات پژوهشگران مختلف در مواد غذایی نظیر سیب (Moreira, Figueiredo & Sereno, 2000)، هویج (Hatamipour & Mowla, 2002)، گیلاس (Ochoa et al., 2002)، گوشت ماهی (Park, 1998) و گوشت خوک (Clemente, Sanjuan & Mulet, 2009) نیز مبین این مطلب است که مدل خطی تفسیر مناسبی از فرآیند چروکیدگی ارائه می‌دهد. شکل ۳ نمونه خشک‌شده و رابطه بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل انتخابی (مدل خطی) در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

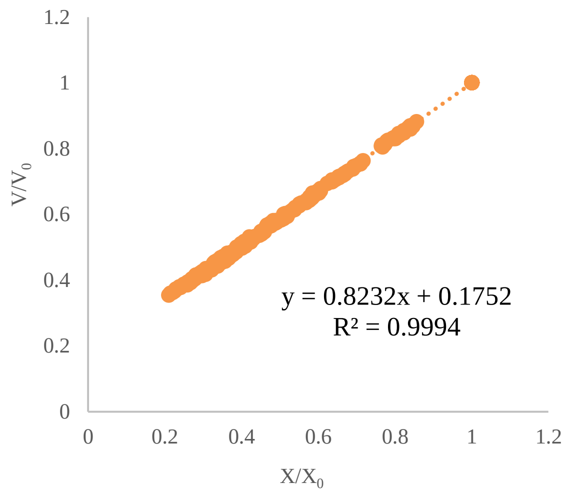
جدول ۳– ضرایب و شاخص‌های آماری استخراج شده برای مدل‌های مختلف چروکیدگی میگو

Table 3- Extracted coefficients and statistical indices for different models of shrimp shrinkage

مدل Model	ضرایب ثابت مدل‌ها Constant coefficients of models					R^2	χ^2	RMSE	SSE
	a	b	c	d	k				
1	0.823	0.175	-	-	-	0.999	2.16E-05	0.0046	2.15E-05
2	0.132	-4.597	1.882	-	-	0.981	0.0006	0.0260	0.0006
3	0.243	0.103	0.042	-2.2E-14	6.836	0.985	0.0005	0.0229	0.0005
4	0.183	0.790	0.260	-	-	0.991	2E-05	0.0044	1.97E-05
5	0.313	1.192	-	-	-	0.985	0.0005	0.0234	0.0005



a



b

شکل ۳– a) نمونه خشک‌شده ورقه گوشت میگو و b) تغییرات بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل انتخابی (مدل ۱) برای چروکیدگی ورقه گوشت میگو

Fig.3. a) Dried shrimp meat slab samples and b) variations between experimental data and data of the selected model (Model 1) for shrimp meat slab shrinkage

بر اساس پژوهش انجام‌شده بین چروکیدگی و دمای انتقال شیشه‌ای ارتباط وجود دارد (Achanta, Okos, Cushman & Kessler, 1997). مواد جامد بی‌شکل (آمورف) در دمای موسوم به دمای شیشه‌ای از حالت جامد به شکل لاستیکی درمی‌آیند. در مواد غذایی با محتوای رطوبتی بالا ماده در حالت لاستیکی قرار دارد و تغییرات بین چروکیدگی و کم شدن میزان آب محصول به‌صورت خطی است، امّا در مواد با محتوای رطوبتی پایین دمای انتقال شیشه‌ای افزایش می‌یابد و ماده با تغییر فاز وارد حالت شیشه‌ای می‌شود. در موادی نظیر گوشت مرغ، گوشت ماهی تن و گوشت خوک که محتوای رطوبتی بالایی دارند این تغییر فاز در دماهای زیر صفر درجه سلسیوس رخ می‌دهد (Clemente et al., 2009). با توجه به این‌که میگو محصولی با محتوای رطوبتی بالا است و فرآوری آن نیز

در درجه حرارت‌های بالا صورت می‌پذیرد، بنابراین تغییر فازی در آن رخ نمی‌دهد و در نتیجه تغییرات خطی بین چروکیدگی و میزان رطوبت دور از انتظار نیست. با توجه به اهمیت چروکیدگی و تأثیر زیادی که بر فرآیند خشک‌کردن دارد، این پدیده حتماً بایستی در شبیه‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن در نظر گرفته شود.

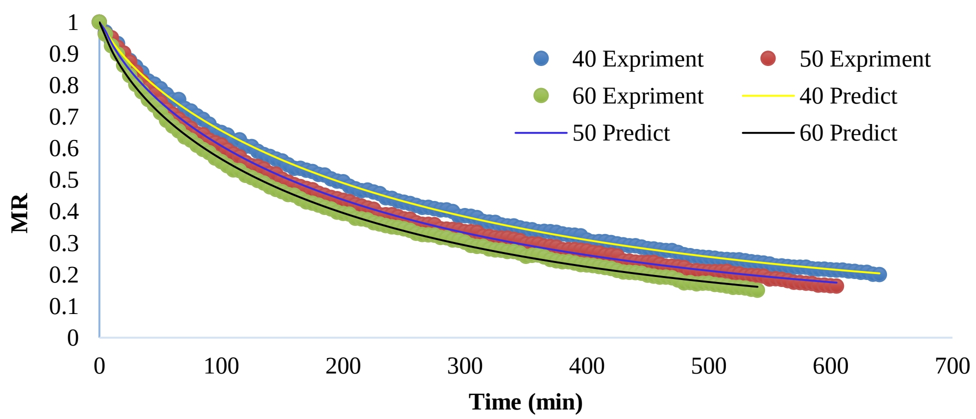
خشک کردن

فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های میگو در هر سطح دمایی با استفاده از ۸ مدل ارائه‌شده در جدول ۱ با داده‌های تجربی برازش شدند. در جدول ۴ ثابت‌های استخراج‌شده برای هر مدل و در جدول ۵ شاخص‌های آماری مربوط به هر مدل ارائه گردیده است. با توجه به نتایج حاصل‌شده، مدل توزیع ویبال در هر سه سطح دمایی در نظر گرفته‌شده دارای بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مربع کای (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE) است. بنابراین مدل ویبال به‌عنوان بهترین مدل برای بیان سینتیک خشک‌کردن ورقه گوشت میگو پیشنهاد می‌شود. این انطباق مناسب در شکل ۴ قابل مشاهده است.

جدول ٤- ضرایب ثابت مدل‌های مختلف خشک‌کردن ورقه گوشت میگو

Table 4- Constant coefficients of different models of shrimp meat slab drying

نام مدل Model	دمای خشک‌کردن Drying temperature (°C)	ضرایب ثابت مدل‌ها Constant coefficients of models a	b	c	k	n
Newton	40	-	-	-	5.17E-05	-
	50	-	-	-	6.15E-05	-
	60	-	-	-	7.19E-05	-
Henderson & Pabis	40	0.885	-	-	4.41E-05	-
	50	0.873	-	-	5.19E-05	-
	60	0.861	-	-	5.97E-05	-
Logarithmic	40	0.778	-	0.174	7.54E-05	-
	50	0.778	-	0.160	8.88E-05	-
	60	0.783	-	0.0001	0.15	-
Logestic	40	1.081	0.222	-	4.41E-05	-
	50	1.072	0.227	-	5.19E-05	-
	60	1.062	0.233	-	5.97E-05	-
Two-term exponential	40	0.188	-	-	0.0002	-
	50	0.197	-	-	0.0002	-
	60	0.196	-	-	0.0003	-
Simplified Fick's diffusion	40	0.885	1.18E-05	0.157	-	-
	50	0.873	1.39E-05	0.156	-	-
	60	0.861	0.0003	2.39	-	-
Wang & Singh	40	-5E-05	8E-10	-	-	-
	50	-5.6E-05	9.89E-10	-	-	-
	60	-6.5E-05	0.128E-10	-	-	-
Weibull distribution	40	0.074	-0.94	-	0.0006	0.76
	50	0.049	-0.98	-	0.0011	0.71
	60	0.016	-1.02	-	0.0016	0.68



شکل ٤- نمودار تغییرات رطوبت نسبی واقعی و پیش‌بینی‌شده نسبت به زمان با مدل ویبال

Fig.4. Diagram of actual and predicted relative humidity vs. time with Weibull model

جدول ۵- شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف خشک‌کردن ورقه گوشت میگو

Table 5- Statistical indices of different models of shrimp meat slab drying

نام مدل Model	دمای خشک‌کردن Drying temperature (°C)	R^2	χ^2	RMSE	SSE
Newton	40	0.986	0.0024	0.0491	0.0024
	50	0.982	0.0029	0.0536	0.0028
	60	0.983	0.0031	0.0562	0.0031
Henderson & Pabis	40	0.978	0.0009	0.0299	0.0008
	50	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
	60	0.973	0.0011	0.0342	0.0011
Logarithmic	40	0.996	0.0001	0.0118	0.0001
	50	0.993	0.0002	0.0168	0.0003
	60	0.991	0.0003	0.0185	0.0003
Logestic	40	0.979	0.0009	0.0299	0.0008
	50	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
	60	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
Two-term exponential	40	0.996	0.0004	0.0216	0.0004
	50	0.994	0.0006	0.0259	0.0006
	60	0.994	0.0008	0.0282	0.0008
Simplified Fick’s diffusion	40	0.978	0.0009	0.0299	0.0008
	50	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
	60	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
Wang & Singh	40	0.977	0.0019	0.0437	0.0019
	50	0.965	0.0030	0.0543	0.0029
	60	0.961	0.0036	0.0596	0.0035
Weibull distribution	40	0.999	2.39E-05	0.0048	2.32E-05
	50	0.998	7.2E-05	0.0083	6.97E-05
	60	0.998	6.29E-05	0.0077	6.06E-05

نتایج به‌دست‌آمده در این بخش منطبق با پژوهش‌های مختلفی است که در زمینه کاربرد مدل ویبال در صنایع غذایی و فرآیند خشک کردن محصولات مختلف انجام شده است. پژوهشگران متعددی برای بررسی سینتیک خشک شدن محصولاتی نظیر انبه (Corzo, Bracho & Pereira, 2008)، ورقه‌های ماهی ساردین (Corzo & Bracho, 2008)، عناب (Yi et al., 2012)، انگور (Bai et al., 2013)، سیب‌زمینی (Dai et al., 2018) و ماش سیاه (Gaikwad, Sunil, Negi & Pare, 2022) از مدل توزیع ویبال استفاده نموده‌اند. مطابق نتایج حاصل در این پژوهش‌ها مدل ویبال به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی تغییرات در محتوای رطوبت در طول فرآیند خشک‌کردن دارا بود. دلیل این موضوع به ویژگی‌های تابع یادشده از جمله رابطه نمایی غیرخطی باز می‌گردد. این مدل به‌خوبی قابلیت توصیف رفتار پدیده‌هایی را که درجات مختلفی از تغییرپذیری را نشان می‌دهند دارد (Corzo & Bracho, 2008). همچنین مدل ویبال بدلیل سادگی و قابلیت انعطاف به‌خوبی می‌تواند رفتار سینتیکی محصولات در حال خشک‌شدن را پیش‌بینی کند (Ling, Teng & Lin, 2018). نکته حائز اهمیت دیگر وابستگی ضرایب مدل به درجه حرارت هوای خشک‌کن است، که نتایج سایر پژوهش‌ها نیز مبین این مطلب است.

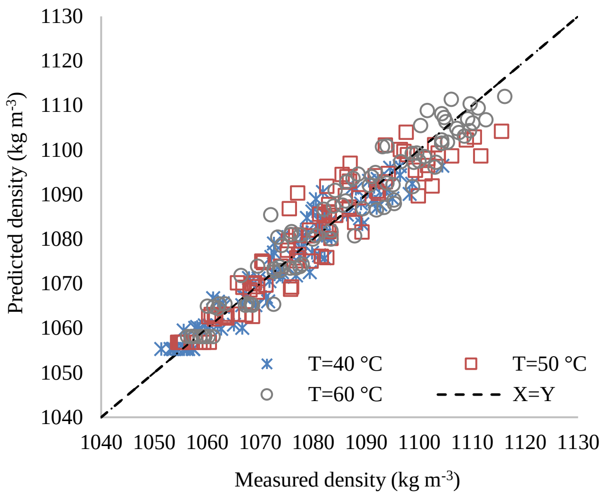
جرم حجمی

با برازش داده‌های تجربی بر رابطه (۶) ثابت‌های مدل در نظرگرفته‌شده برای جرم حجمی ظاهری میگو به‌صورت جداگانه در هر سطح دمایی محاسبه شدند که ضرایب آن در جدول ۶ ارائه شده است. افزون بر آن، شکل ۵ انطباق مناسب بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای جرم حجمی ظاهری میگو را به نمایش گذاشته است.

جدول ٦- ضرایب تجربی رابطه ۶ در دماهای مختلف خشک کردن

Table 6- Experimental coefficients of Equation 6 at different drying temperatures

دمای خشک‌کن Drying temperature (°C)	C_1	C_2	R^2
40	1193.7	-170.17	0.918
50	1187.9	-163.35	0.895
60	1182.3	-156.15	0.937



شکل ۵– داده‌های تجربی جرم حجمی میگو در مقابل داده‌های پیش‌بینی‌شده در دماهای مختلف خشک‌کردن

Fig.5. Experimental data of shrimp density versus predicted data at different drying temperatures

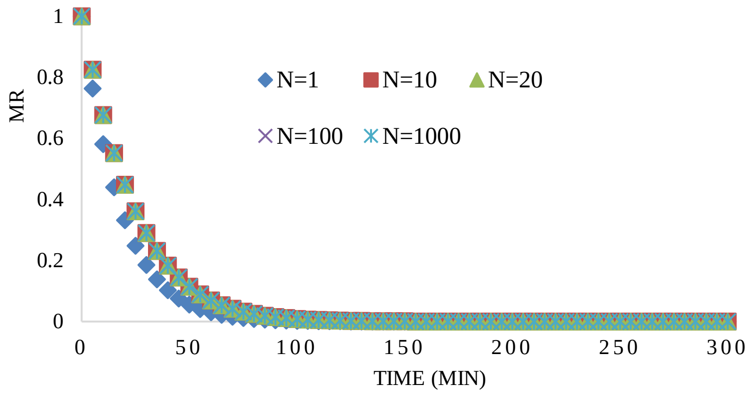
طبق نتایج حاصله جرم حجمی ظاهری نمونه‌های میگو در دامنه ۱۰۵۰–۱۱۱۷ $kg\ m^{-3}$ تغییر می‌کند. با توجه به گزارش ارائه‌شده دامنه تغییرات جرم حجمی ظاهری میگو در محدوده $kg\ m^{-3}$ ۱۰۹۳–۱۰۴۲ در دمای ۲۰ درجه سلسیوس است (Shafiur Rahman & Driscoll, 1993). در موادی نظیر گوشت میگو به‌دلیل ضعیف شدن پیوند مولکولی در ساختارهای پروتئینی در زمان خشک‌شدن، پدیده چروکیدگی رخ می‌دهد (Kassama & Ngadi, 2004). این پدیده به‌نوبه خود باعث ایجاد تغییرات حجمی می‌شود، که در نهایت به تغییر در جرم حجمی ظاهری منجر می‌شود. علاوه بر این عواملی مانند هندسه نمونه، روش خشک‌کردن، شرایط انجام آزمایش و دما نیز می‌تواند جرم حجمی ظاهری را تحت تأثیر قرار دهد (Kassama & Ngadi, 2016).

معادله ضریب انتشار مؤثر رطوبت

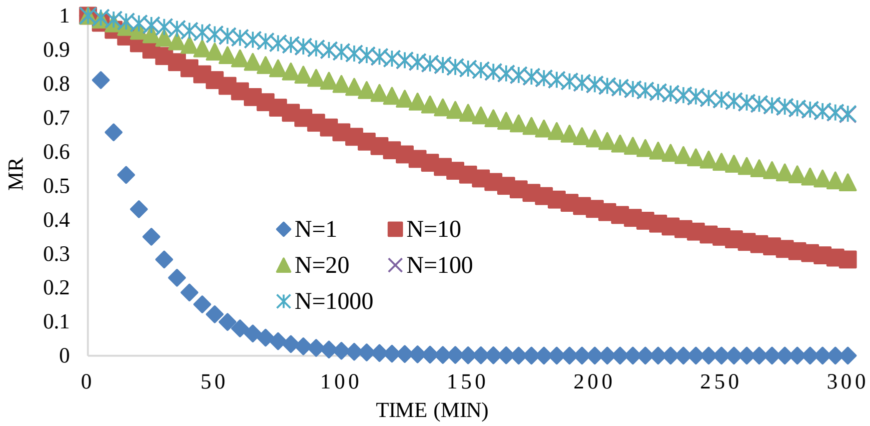
در این بخش، ابتدا رابطه (۳) با در نظر گرفتن تعداد جملات بیان‌شده (1,10,20,100,1000) با فرض ضریب انتشار نمونه‌ها، مطابق با الگوریتم ارائه‌شده بسط داده شد. در هر مقدار از ضریب انتشار ثابت در نظر گرفته‌شده، اثر تعداد جملات بر روی تغییرات نسبت رطوبت در مقابل زمان مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد جمله‌ها بیشتر از ۱۰۰، اثر قابل‌ملاحظه‌ای در خروجی مدل مشاهده نمی‌شود. بر همین اساس تعداد جملات بسط قانون فیک (رابطه ۳) برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد. تغییرات در ضریب انتشار مؤثر میگو در طی فرآیند خشک‌شدن با تخمین ضرایب رابطه (۵) به‌دست آمد. مطابق نتایج حاصل‌شده رابطه (۱۱) برای تخمین ضریب انتشار مؤثر میگو مشخص شد:

$$D_e = 0.0002\, exp\left(-\frac{4612.96}{273.15+T} + 0.839X\right) \quad (۱۱)$$

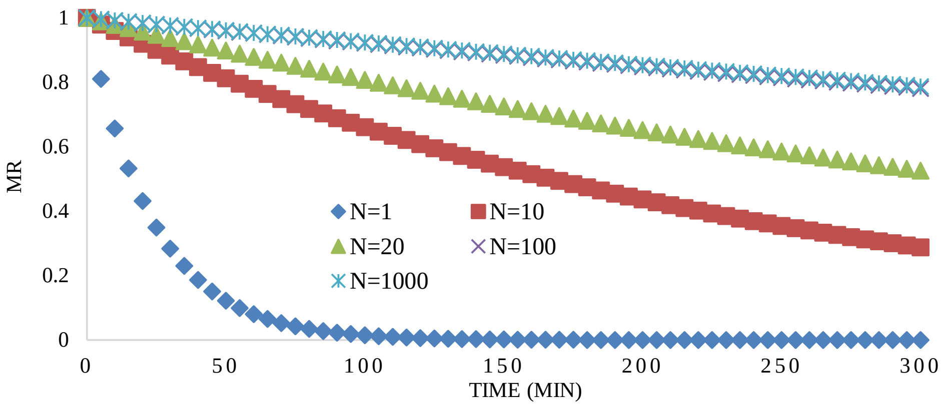
در تفسیر منحنی‌های خشک شدن پدیده چروکیدگی و تغییرات ضریب انتشار رطوبت اهمیت به‌سزایی دارند (Amankwah *et al.*, 2018). تخمین مناسب از ضریب انتشار مؤثر زمانی حاصل می‌شود که چروکیدگی و ضریب انتشار هر دو، به‌صورت تابعی از رطوبت در نظر گرفته شوند (Ruiz-López & García-Alvarado, 2007). رابطه (۱۱) علاوه بر داشتن موارد فوق دارای چهارچوبی مشابه سایر مواد غذایی است. از معادلاتی مشابه برای تخمین تغییرات ضریب انتشار مؤثر هویج (Zielinska & Markowski, 2007)، گوشت گوساله (Trujillo, Wiangkaew & Tuan Pham, 2007) و ماهی تیلاپیا (Komolafe *et al.*, 2018) نسبت به دما و رطوبت استفاده شده است.



(a)



(b)



(c)

شکل ٦– نتایج بسط تقریبی معادله انتشار در ضریب انتشار ثابت: a) $D=1\times10^{-7}$ $m^2 s^{-1}$، b) $D=1\times10^{-10}$ $m^2 s^{-1}$، c) $D=5\times10^{-11}$ $m^2 s^{-1}$

Fig.6. Effect of the constant diffusion coefficient on the approximate expansion of the diffusion equation: a) $D = 1 \times 10^{-7}$ $m^2 s^{-1}$, b) $D = 1 \times 10^{-10}$ $m^2 s^{-1}$, and c) $D = 5 \times 10^{-11}$ $m^2 s^{-1}$

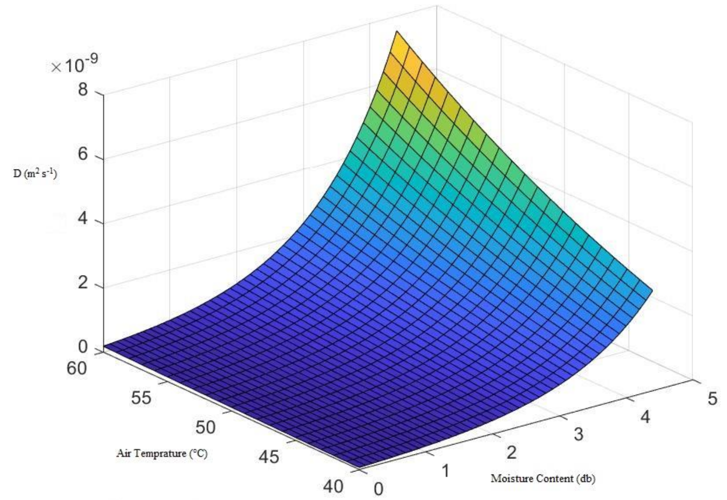
جدول ۷– شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده برای تخمین ضرایب رابطه (۵) در دماهای مختلف خشک‌کردن

Table 7- Statistical indices obtained for estimating the coefficients of Equation 5 at different drying temperatures

دمای خشک‌کن Drying temperature (˚C)	R^2	RMSE	SSE
40	0.999	0.0082	6.78E-05
50	0.998	0.0158	0.0003
60	0.999	0.0108	0.0001

در جدول ۷ شاخص‌های آماری مربوط به تخمین ضرایب رابطه (۵) در هر سطح دمای خشک‌کن ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل و ضرایب تبیین به‌دست‌آمده، رابطه (۱۱) به‌خوبی می‌تواند تخمین مناسبی از ضریب انتشار میگو در محدوده آزمایش‌های تجربی انجام‌شده ارائه دهد. شکل ۷ میزان تغییرات ضریب انتشار مؤثر میگو در مقابل تغییرات دما و محتوای رطوبتی مطابق رابطه (۱۱) را نشان می‌دهد، به نحوی که با افزایش دمای خشک‌کردن و افزایش محتوای رطوبتی، ضریب انتشار مؤثر میگو افزایش می‌یابد.

محدوده تغییرات ضریب انتشار مؤثر میگو طبق نتایج حاصل‌شده در دامنه ۰/۰۸×۱۰$^{-۹}$ $m^2 s^{-1}$ تا ۷/۳۹×۱۰$^{-۹}$ $m^2 s^{-1}$ گزارش شده است که در محدوده مورد انتظار برای مواد غذایی خشک‌شده (از ۱۰$^{-۱۲}$ $m^2 s^{-1}$ تا ۱۰$^{-۸}$) قرار دارد (Giovanelli, Zanini, Lavelli & Nani, 2002; Gely & Santalla, 2007; Falade & Solademi, 2010). دامنه‌های ۰/۲۱×۱۰$^{-۹}$ $m^2 s^{-1}$ تا ۴/۳۴×۱۰$^{-۹}$ $m^2 s^{-1}$ (Nguyen *et al.*, 2019) و ۱/۴۸۹×۱۰$^{-۸}$ $m^2 s^{-1}$ تا ۲/۹۶۰×۱۰$^{-۸}$ $m^2 s^{-1}$ (Costa, Silva, Rodrigues, Silva & Cruz Rodrigues, 2018) برای ضریب انتشار مؤثر میگو نیز گزارش شده است. علت اختلاف بین نتایج پژوهش‌های مختلف را می‌توان به لحاظ کردن یا نکردن پدیده چروکیدگی طی فرآیند خشک‌کردن مرتبط دانست. ضریب انتشار مؤثر به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن چروکیدگی از طریق رابطه (۴) حاصل شده است، در حالی‌که اگر ضریب انتشار با فرض چروکیدگی قابل‌چشم‌پوشی به‌دست‌آمده باشد به دلیل مسیر طولانی‌تر انتشار رطوبت بالاتر خواهد بود (Zielinska & Markowski, 2007). علاوه بر این تغییرات در دامنه مقادیر ضریب انتشار را می‌توان به عواملی مانند انواع و شرایط روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای تعیین ضریب انتشار مؤثر، روش پردازش داده‌ها، پیچیدگی ساختار ماده غذایی، دمای خشک‌کردن و میزان رطوبت مرتبط دانست (Costa *et al.*, 2018).



شکل ۷- تغییرات در ضریب نفوذ مؤثر میگو در مقابل تغییرات دما و محتوای رطوبت

Fig.7. Variations in the effective diffusion coefficient of shrimp versus changes in temperature and moisture content

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های گوشت میگو، تغییرات چروکیدگی و رابطه ضریب انتشار مؤثر ورقه‌های گوشت میگو مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق نتایج، در بین مدل‌های چروکیدگی ارزیابی‌شده مدل خطی با بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مربع کای (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE)، بهترین مدل برای تفسیر چروکیدگی در دماهای مورد آزمایش بود. همچنین مدل تجربی توزیع ویبال در محدوده دمایی ارزیابی‌شده با داشتن بهترین شاخص‌های آماری مناسب‌ترین مدل برای بیان تغییرات نسبت رطوبت ورقه‌های گوشت میگو در مقابل زمان است. طبق نتایج حاصل‌شده در این پژوهش مدل آرنیوس پیشنهادی برای پیش‌بینی ضریب انتشار مؤثر ورقه میگو به‌خوبی می‌تواند تغییرات ضریب انتشار ورقه گوشت میگو را نسبت به دما و

محتوای رطوبت در محدوده دمایی مورد ارزیابی پیش‌بینی کند. افزون بر آن، مشخص شد بسط قانون دوم فیک بیش از ۱۰۰ جمله اثر قابل‌توجهی بر خروجی مدل ندارد و بسط ۱۰۰ جمله برای این قانون پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

هزینه‌های این پژوهش از گرنت پژوهشی به شماره ۱۹۷۱ توسط معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز تامین شده است که به این وسیله قدردانی می‌شود.

مشارکت نویسندگان

محسن المعی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه
سید مهدی نصیری: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، مشاوره فنی، ویرایش متن
محمد امین نعمت‌اللهی: مشاوره فنی، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، اعتبارسنجی، ویرایش متن
داریوش زارع: مشاوره فنی، ویرایش متن
محمد خرم: مشاوره فنی، ویرایش متن

References

1. Achanta, S., Okos, M. R., Cushman, J. H., & Kessler, D. P. (1997). Moisture transport in shrinking gels during saturated drying. *Association of International Chemical Engineers Journal*, *43*(8), 2112-2122. https://doi.org/10.1002/aic.690430818
2. Akonor, P. T., Ofori, H., Dziedzoave, N. T., & Kortei, N. K. (2016). Drying characteristics and physical and nutritional properties of shrimp meat as affected by different traditional drying techniques. *International Journal of Food Science*, 2016. 7879097. https://doi.org/10.1155/2016/7879097
3. Al-Hilphy, A., Al-Mtury, A., Al-Iessa, S., Gavahian, M., Al-Shatty, S., Jassim, M., & Mohusen, Z. (2022). The pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): mathematical modeling and effect on the chemical, color components, and sensory attributes. *Journal of Food Process Engineering*, *45*(6). https://doi.org/10.1111/jfpe.13945
4. Amankwah, E. A., Dzisi, K. A., Staten, G., & Boxtel, A. J. B. (2018). Moisture Dependent Diffusion and Shrinkage in Yam during Drying. *International Journal of Food Engineering*. https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0394
5. Anabel, F., Celia, R., Germán, M., & Rosa, R. (2018). Determination of effective moisture diffusivity and thermodynamic properties variation of regional wastes under different atmospheres. *Case Studies in Thermal Engineering*, *12*(2018), 248-257. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.015
6. Aniesrani Delfiya, D. S., Murali, S., Alfiya, P. V., & Samuel, M. P. (2020). Drying characteristics of shrimp (*Metapenaeus dobsoni*) in electrical dryer. *Pantnagar Journal of Research*, *18*(3), 281-285.
7. Anonymous. (2020). *Iran Fisheries Organization statistical yearbook, 2014-2020*. Iran Fisheries Organization Tehran. Iran. (in Persian).
8. Azimi, M. J. (2016). *Cabinet Drying, Freeze Drying and Sun Drying methods of shrimp and study of its Physicochemical and Microbial*. M.Sc. dissertation. University of Shiraz. Shiraz. (in Persian).
9. Azzouz, S., Guizani, A., Jomma, W., & Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, *55*(4), 323-330. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00109-7
10. Bai, J., Wang, J., Xiao, H., Ju, H., Liu, Y., & Gao, Z. (2013). Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *29*(16), 278-285.
11. Blikra, M. J., Skipnes, D., & Feyissa, A. H. (2019). Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven. *Food Control*, *102*, 29-37. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.001
12. Buzrul, S. (2022). Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. *Processes*, *10*(1), 118. https://doi.org/10.3390/pr10010118
13. Ceylan, İ. (2008). Determination of drying characteristics of timber by Using artificial neural networks and mathematical models. *Drying Technology*, *26*(12), 1469-1476. https://doi.org/10.1080/07373930802412132
14. Clemente, G., Bon, J., Sanjuan, N., & Mulet, A. (2009). Determination of Shrinkage Function for Pork Meat Drying. *Drying Technology*, *27*(1), 143-148. https://doi.org/10.1080/07373930802566051
15. Corzo, O., & Bracho, N. (2008). Application of Weibull distribution model to describe the vacuum pulse osmotic dehydration of sardine sheets. *Lwt- Food Science and Technology*, *41*(6), 1108-1115. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.06.018
16. Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A. & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *Lwt- Food Science and Technology*, *41*(10), 2023-2028. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.002
17. Costa, M. V., Silva, A. K. N., Rodrigues, P. R., Silva, L. H. M., & Cruz Rodrigues, A. M. (2018). Prediction of

moisture transfer parameters for convective drying of shrimp at different pretreatments. *Food Science and Technology*, *38*(4), 612-618. https://doi.org/10.1590/fst.31517

18. Dai, J. W., Wang, J., Ren, L., Liu, Y. W., & Zhang, L. H. (2018). *Mathematical model of potato slices under process-based temperature and humidity integration control of tilted tray air impingement drying*. In: Proceedings of 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). 14-15 July. Shenzhen, China. pp. 50-56. https://doi.org/10.2991/iceep-18.2018.9
19. Doymaz, İ. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *47*(5), 914-919. https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.003
20. Erşan, A. C., & Tugrul, N. (2020). The drying kinetics and characteristics of Shrimp dried by conventional methods. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, *27*(4), 319-328. https://doi.org/10.2298/ciceq201114050e
21. Falade, K. O., & Solademi, O. J. (2010). Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International Journal of Food Science & Technology*, *45*(2), 278-288. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02133.x
22. Farhang, A., Hosainpour, A., Darvishi, H., & Nargesi, F. (2011). Shrimp drying characterizes undergoing microwave treatment. *Journal of Agricultural Science*, *3*(2), 157-164. https://doi.org/10.5539/jas.v3n2p157
23. Gaikwad, P. S., Sunil, C. K., Negi, A., & Pare, A. (2022). Effect of microwave assisted hot-air drying temperatures on drying kinetics of dried black gram papad (Indian snack food) Drying characteristics of black gram papad. *Applied Food Research*, *2*(2022). https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100144
24. Gely, M. C., & Santalla, E. M. (2007). Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering*, *78*(3), 1029-1033. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.015
25. Giovanelli, G., Zanoni, V., Lavelli, V., & Nani, R. (2002). Water sorption, drying and antioxidant properties of tomato products. *Journal of Food Engineering*, *52*(2), 135-141. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00095-4
26. Guiné, R. d. P. F. (2006). Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing*, *84*(3), 179-185. https://doi.org/10.1205/fbp.05106
27. Hashemi, G., Mowla, D., & Kazemeini, M. (2009). Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating. *Journal of Food Engineering*, *92*(3), 331-338. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.004
28. Hatamipour, M. S., & Mowla, D. (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, *55*(3), 247-252. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00082-1
29. Kaminski, E., Szarycz, M., & Janowicz, L. (1996) *The kinetics of drying sliced apples in the conditions of natural convection*. In: Proceedings of 7th Seminar on Properties of water in foods. Warsaw Agricultural University. Warsaw. Poland. pp. 24-34.
30. Kassama, L. S., & Ngadi, M. O. (2004). Pore development in chicken meat during deep-fat frying. *LWT Food Science and Technology*, *37*(8), 841-847. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.03.010
31. Kassama, L. S., & Ngadi, M. O. (2016). Shrinkage and density change of de-boned chicken breast during deep-fat frying. *Food and Nutrition Sciences*, *2016*(7), 895-905. https://doi.org/10.4236/fns.2016.710089
32. Komolafe, C. A., Oluwaleye, I. O., Adejumo, A. O. D., Waheed, M. A., & Kuye, S. I. (2018). Determination of moisture diffusivity and activation energy in the convective drying of fish. *International Journal of Heat and Technology*, *36*(4), 1262-1267. https://doi.org/10.18280/ijht.360414
33. Ling, J., Teng, Z., & Lin, H. (2018). Improved method for prediction of milled rice moisture content based on Weibull distribution. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, *11*(3), 159-165. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3429
34. Manjeet, S. C. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing Thin-Layer drying of In-Shell Pecans. *Transactions of the ASAE*, *27*(2), 610-615. https://doi.org/10.13031/2013.32837
35. Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, *61*(3), 373-386. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4
36. Mohebi, M., Akbarzadeh, M. R., Shahidi, F., & Porshahabi, M. R. (2007). *Investigation of the possibility of using the visual machine and artificial neural network in predicting the moisture content of dried shrimp*. In proceeding of 4th Iranian Machine Vision and Image Processing Conference. 14-15 Feb. Ferdowsi university of Mashhad. Mashhad. Iran. (in Persian).
37. Moreira, R., Figueiredo, A., & Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, *18*(1-2), 279-294. https://doi.org/10.1080/07373930008917704
38. Mulet, A., Garcia Reverter, J., Bon, J., & Berna, A. (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, *18*(6), 1201-1219. https://doi.org/10.1080/07373930008917772
39. Murali, S., Aniesrani Delfiya, D. S., Sathish Kumar, K., Kumar, L. R. G., Ezhil Nilavan, S., Amulya, P. R., Krishnan, V. S., Alfiya P. V., & Samuel M. P. (2021) Mathematical modeling of drying kinetics and quality characteristics of shrimps dried under a Solar–LPG hybrid dryer. *Journal of Aquatic Food Product Technology*,

30(5), 561-578. https://doi.org/10.1080/10498850.2021.1901814
40. Nguyen, M. P., Ngo, T. T., & Le, T. D. (2019). Experimental and numerical investigation of transport phenomena and kinetics for convective shrimp drying. *Case Studies in Thermal Engineering, 14*(2019), 100465. https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100465
41. Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S., & Raghavan, V. G. S. (2008). Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. *Chemical Engineering Science*, *63*(22), 5503-5512. https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.07.031
42. Ochoa, M. R., Kesseler, A. G., Pirone, B. N., Marquez, C. A., & DeMichelis, A. (2002). Volume and area shrinkage of whole sour cherry fruits (Prunus Cerasus) during dehydration. *Drying Technology*, *20*(1), 147-156. https://doi.org/10.1081/DRT-120001371
43. Pabis, S., Jayas, D., & Cenkowski, S. (1998). *Grain drying: Theory and practice*. New York, United States: John Wiley and Sons.
44. Park, K. J. (1998). Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. *Drying Technology*, *16*(3-5), 889-905. https://doi.org/10.1080/07373939808917443
45. Porciuncula, B. D. A., Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2013). Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. *Journal of Food Engineering*, *119*(3), 490-496. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.011
46. Queiroz, M. R., & Nebra, S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of Food Engineering*, *47*(2), 127-132. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00108-4
47. Radhakrishnan, S. (1997). *Measurement of thermal properties of seafood*. M.Sc. dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.
48. Reyes, A., Alvarez, P. I., & Marquardt, F. H. (2002). Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modelling. *Drying Technology*, *20*(7), 1463-1483. https://doi.org/10.1081/DRT-120005862
49. Ruiz-López, I. I., & García-Alvarado, M. A. (2007). Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering*, *79*(1), 208-216. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.051
50. Shafiur Rahman, M., & Driscoll, R. H. (1994). Density of fresh and frozen seafood. *Journal of Food Process Engineering*, *17*(2), 121-140. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1994.tb00331.x
51. Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1984). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, *23*(5), 1261-1265. https://doi.org/10.13031/2013.34757
52. Suvarnakuta, P., Devahastin, S., & Mujumdar, A. S. (2007). A mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 46*(7), 675-683. https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.09.002
53. Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W., & Tirawanichakul, Y. (2011). Drying Strategy of Shrimp using Hot Air Convection and Hybrid Infrared Radiation/Hot Air Convection. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, *5*(1), 77-100.
54. Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, *55*(3), 209-216. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00065-1
55. Trujillo, F. J., Wiangkaew, C., & Tuan Pham, Q. (2007). Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*, *78*, 74-85. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.010
56. Vazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., & Costoyas, A. (1999). The dehydration of garlic. 1. Desorption isotherms and modelling of drying kinetics. *Drying Technology*, *17*(6), 1095-1108. https://doi.org/10.1080/07373939908917596
57. Wang, J., Tang, J., Rasco, B., Sablani, S. S., Ovissipour, M., & Qu, Z. (2018). Kinetics of Quality Changes of Shrimp (Litopenaeus setiferus) During Pasteurization. *Food and Bioprocess Technolgy*, *11*, 1027-1038 https://doi.org/10.1007/s11947-018-2073
58. Wisaiprom, N., Kasayapanand, N., Pratinthong, N., Songprakorp, R., Thepa, S., & Deeto, S. (2018). The study of shrimp drying by greenhouse drying combined with low humidity air. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, *7*(4), 303-313. https://doi.org/10.12720/sgce.7.4.303-313
59. Yi, X. K., Wu, W. F., Zhang, Y. Q., Li, J. X., & Luo, H. P. (2012). Thin-Layer drying characteristics and modeling of Chinese Jujubes. *Mathematical Problems in Engineering, 2012*, 386214. https://doi.org/10.1155/2012/386214
60. Zielinska, M., & Markowski, M. (2007). Drying behavior of carrots dried in a spout–fluidized bed dryer. *Drying Technology*, *25*(1), 261-270. https://doi.org/10.1080/07373930601161138